

ارائه روابطی برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری TBM سنگ در تونل زاگرس

سید جلال حسینی^۱؛ مهدی حسینی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، seyedjalal_h@yahoo.com

۲- دانشیار، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، meh_hosseini18@yahoo.com

(دریافت ۲۰ تیر ۱۳۹۴، پذیرش ۳۱ فروردین ۱۳۹۵)

چکیده

ماشین‌های حفار تمام مقطع (TBM) از مهم‌ترین ماشین‌های حفاری در تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی به هستند. به دلیل قیمت بالای ماشین، ارزیابی عملکرد در روش حفاری با استفاده از این ماشین‌ها بسیار مهم است. بنابراین مهم‌ترین شاخص ارزیابی عملکرد ماشین حفار تونل، نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری این دستگاه است. روش‌ها و روابط متنوعی برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری وجود دارد که هر کدام ویژگی‌های خاص خود را دارد و بر اساس پارامترهای مربوط به توده‌سنگ و مشخصات ماشین ارائه شده‌اند. در این تحقیق با به‌کارگیری روش رگرسیون خطی چند متغیره و با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی توده‌سنگ و ماشین حفار تونل (TBM) روابطی برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری در تونل زاگرس ۱ ارائه شد. برای بررسی اعتبار سنجی این رابطه، ضریب بهره‌وری در بعضی مقاطع تونل قمرود توسط این رابطه تخمین زده شد و خطای نتایج روش رگرسیون با خطای نتایج دو روش NTH و CSM محاسبه شده است که خطای نتایج روش رگرسیون نسبت به مقدار واقعی، کمتر از خطای نتایج نسبت به روش NTH و روش CSM و در برخی موارد بیشتر از روش NTH و کمتر از روش CSM است و در واقع روش رگرسیون بین این دو روش قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که معادله پیشنهادی در این پروژه با تقریب خوبی نسبت به واقعیت، ضریب بهره‌وری را پیش‌بینی می‌کند.

کلمات کلیدی

ضریب بهره‌وری، ماشین حفاری تی بی ام، توده‌سنگ، تونل زاگرس ۱

۱- مقدمه

این ماشین‌ها در زمین‌های سست و ریزشی، محدود به سرعت نصب قطعات بتنی است. ماشین‌های تک‌سپری به‌صورت استوانه دارای پوشش بوده که در قسمت جلوی آن صفحه حفار و در قسمت عقب دستگاه نصب سگمنت و جک‌های پیشران قرار گرفته‌اند.

۱-۳- دستگاه‌های حفر تمام مقطع سپر تلسکوپی^۲

برای اولین بار این نوع ماشین با هدف کار در زمین‌های با شرایط نامناسب و یا هنگامی که سرعت اجرای بالا مورد نیاز است، به عرصه مهندسی تونل معرفی شد. این ماشین علاوه بر دو سر جلو و عقب، مجهز به جک‌های پیشران همانند ماشین تک‌سپری و کفشک، همانند ماشین‌های باز است [۲].

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای ساخت یک مدل عمومی که تمامی پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ ماشین را در نظر بگیرد، انجام شده است. اما ساخت چنین مدلی، کاری بسیار دشوار و تا حدی غیرممکن بوده است. بنابراین تمامی مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین (مدل‌های نظری و تجربی) در عمل با خطاهایی همراه است. از میان همه مدل‌های پیش‌بینی، مدل تجربی، نروژی (NTH)، مدل تجربی Q_{TBM} و مدل نظری مدرسه معدن کلرادو (CSM) مقبولیت بیشتری دارد. محققان مختلفی روی اثر خصوصیات سنگ بکر و توده‌سنگ بر کارایی تی بی ام، برای تخمین نرخ نفوذ بررسی کرده‌اند. تحقیقات صورت گرفته در سه دهه اخیر نشان می‌دهد که برقراری ارتباط بین عملکرد تی بی ام و خواص توده‌سنگ از نظر فنی بسیار مشکل و پیچیده است. اکثر روابط ارائه شده (به جز مدل‌های CSM، NTH و Q_{TBM} که برای تخمین ضریب بهره‌وری نیز استفاده می‌شود) برای تخمین نرخ نفوذ است (جدول ۱). مرور پژوهش‌ها و روابط ذکر شده در جدول مشخص می‌کند این روابط راه‌حلی واحد و مناسبی را برای پیش‌بینی نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری تی بی ام در پروژه‌های واقعی ارائه نمی‌دهد. اخیراً برخی از محققان روش شبکه عصبی مصنوعی را برای بررسی نرخ نفوذ استفاده کرده‌اند. شبکه عصبی به‌عنوان ابزار جدیدی برای آنالیز کردن مشکلات ژئوتکنیکی پدیدار شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی با تعداد کافی داده ساده آموزش می‌بیند و تابع هدف را با داشتن الگوی مشابه مبتنی بر آموزش‌های قبلی پیش‌بینی خواهد کرد.

بعد از ساخت موفق اولین ماشین تونل‌زنی تمام مقطع (TBM) در دهه ۱۹۵۰ و از زمانی که این ماشین وارد چرخه فعالیت‌های تونل‌سازی شد، آنالیز عملکرد آن‌ها و توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق به‌عنوان اهداف نهایی بسیاری از محققین مدنظر قرار گرفت و مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی عملکرد این ماشین‌ها بر اساس تحقیقات تئوری و تجربی مطرح شده است. تمام این مدل‌ها به‌منظور تخمین درست نرخ نفوذ ماشین و چگونگی تعامل بین توده‌سنگ و ویژگی‌های ماشین حفاری بوده است. به‌طور خلاصه، تمام مدل‌های پیش‌بینی به دو دسته تئوری و تجربی تقسیم می‌شوند. مدل‌های تئوری فرآیند اثر نیروی برش توسط تیغه‌ها بر روی توده‌سنگ را در مقیاس آزمایشگاهی آنالیز می‌کنند تا رابطه تعادلی بین نیروها را پیدا کنند. در مدل‌های تجربی از پارامترهای توده‌سنگ و پارامترهای عملیاتی به همراه طراحی ماشین برای تخمین عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع، در شرایط زمین‌شناسی متفاوت استفاده شده است. پارامترهای توده‌سنگ و پارامترهای عملیاتی به همراه طراحی ماشین برای تخمین عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع، در شرایط زمین‌شناسی متفاوت استفاده شده است. یک مدل واقع‌گرایانه برای ارزیابی عملکرد ماشین، می‌بایست با آزمایش‌های آزمایشگاهی، زمین‌شناسی منطقه و شرایط ساخت ترکیب شود. مشخصات ماشین‌های حفر تونل بسیار متنوع است، در طبقه‌بندی ماشین‌های حفر تونل، این ماشین‌ها به دو گروه تی بی ام‌های خاک و تی بی ام‌های سنگ تقسیم می‌شوند. در ادامه انواع تی بی ام‌های سنگ توضیح داده شده است [۱].

۱-۱- دستگاه حفر تمام مقطع سپر باز^۱

این نوع ماشین برای حفر تونل در سنگ‌های سخت به‌کار می‌رود، این ماشین‌ها طراحی متفاوتی دارند ولی در کل دو سیستم دوکفشکه و تک‌کفشکه، عمومیت بیشتری در میان سازندگان و استفاده‌کنندگان این نوع ماشین‌ها دارند.

۱-۲- دستگاه‌های حفر تمام مقطع تک‌سپری^۲

این ماشین‌ها در شرایطی به‌کار می‌روند که توده‌سنگ درون‌گیر تونل به قدری سست باشد که امکان استفاده از کفشک برای تأمین نیروی پیشروی وجود نداشته باشد. نصب قطعات بتنی در داخل سپر از ریزش دیواره‌ها جلوگیری کرده و محیط مناسب برای فعالیت کارگران فراهم می‌کند. سرعت پیشروی

جدول ۱: روابط ارائه شده برای پیش‌بینی نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری تی بی ام توسط شماری از محققین [۱۲-۳]

$PR = 3.716 - 0.019H_T$, $H_T = H_R \times (H_A)^{0.5}$	تارکی (۱۹۷۳) [۳]
$PR = 624 \frac{F_n}{\sigma_{TB}}$	فارمر و گلوبسوپ (۱۹۸۰) [۴]
$PR = -0.0059RSR + 1.59$	کاسینلی و همکاران (۱۹۸۲) [۵]
$PR = ib \times K_s \times K_d$	لیزلرود و همکاران (۱۹۸۸) [۶]
$PR = 0.5355 - 8.49 - 0.00344T - 0.000823N + 0.0137\phi$	بامفورد (۱۹۸۴) [۷]
$PR = \sigma_c^{-0.437} - 0.047RSR + 3.15$	ایناراتو (۱۹۹۱) [۸]
$PR = 5Q_{TBM}^{-0.2}$	بارتن (۱۹۹۹) [۹]
$SP = 250 \sigma_{cm}^{-0.66}$, $\sigma_{cm}^{-0.66} = \sigma_c \exp\left(\frac{RMR - 100}{18}\right)$	ریباچی و لمبوفازی (۲۰۰۵) [۱۰]
$ARA = 0.422ME - 11.61$	بینیائوسکی و همکاران (۲۰۰۷) [۱۱]
$FPI = 0.222BRMR + 2.755$	حسن پور و همکاران (۲۰۱۰) [۱۲]
$FPI = 11.718Q^{0.098}$	حسن پور و همکاران (۲۰۱۰) [۱۳]
$FPI = 4.161 + 0.091\sigma_c + 0.077RQD + 0.117 + J_c + 1.077\log\alpha$	خادمی حمیدی و همکاران (۲۰۱۰) [۱۴]
$FPI = 9.401 + 0.397\log\alpha + 0.011J_c^2 + (1.14 \times 10^{-5}RQD^3 + (\frac{1}{14} \times 10^{-5})\sigma_c^4)$	خادمی حمیدی و همکاران (۲۰۱۰) [۱۳]

در روابط ارائه شده در جدول:

PR: نرخ نفوذ (واحد نرخ نفوذ در روابط تارکی و فارمر بر حسب میلی‌متر به ازای هر دور چرخش کله حفار و در سایر روابط بر حسب متر بر ساعت است)، K_s : ضریب اصلاح کلاس درزه ها، H_T : سختی کل، K_d : ضریب اصلاح قطر دیسک، H_R : سختی چکش اشمیت، T: نیروی محوری ماشین، H_A : سختی سایشی، N: شاخص نفوذ، F_n : نیروی نفوذ هر دیسک، ϕ : زاویه اصطکاک داخلی، σ_{TB} : مقاومت کششی برزیلی، σ_c : مقاومت تک محوری ماده سنگ، ib : نرخ نفوذ پایه شده، ARA^f : متوسط نرخ پیشروی، ME: اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ، σ_{cm} : مقاومت تک‌محوری توده‌سنگ، FPI^g : اندیس نفوذ میدانی،

$BRMR^f$: RMR پایه (RMR بدون در نظر گرفتن جهت یافتگی ناپیوستگی)، α : زاویه بین محور تونل با صفحات ناپیوستگی.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود در روابط اولیه بر اساس یک پارامتر یا دو پارامتر نرخ نفوذ ماشین حفاری تخمین زده می‌شد. اما این روند تکمیل شد و در روابط بعدی از طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها مانند GSI، RMR و Q که بر اساس چندین پارامتر، توده‌سنگ را طبقه‌بندی می‌کنند استفاده شد (رابطه ۱) [۱۲].

$$FPI = 9.273e^{0.008GSI}$$

(رابطه ۱)

البته با توجه به این که هر کدام از طبقه‌بندی‌ها معایب و مزایایی دارند در روابط جدیدتر پارامترهای طبقه‌بندی‌های مختلف به کار گرفته شده است (رابطه ۲) [۱۳].

$$FPI = 1.828\sigma_c^{0.313} \cdot RQD^{0.207} \cdot J_c^{0.044} \cdot \alpha^{0.012}$$

(رابطه ۲)

هدف از انجام این تحقیق، ارائه روابطی مناسب برای تخمین ضریب بهره‌وری ماشین در هنگام حفاری تونل با ماشین حفاری تی بی ام سپر تلسکوپی و مقایسه آن با سایر مدل‌ها است. ضریب بهره‌وری به عنوان نسبت زمان حفاری دستگاه تی بی ام در یک شیفت به زمان کل شیفت تعریف می‌شود. ضریب بهره‌وری به عوامل زمین‌شناسی (مانند خصوصیات درزه‌ها، تعداد درزه‌ها و غیره)، ژئوتکنیکی (مانند مقاومت تراکمی، کششی سنگ)، مشخصات ماشین (مانند نیروی پیشران، سرعت چرخش کله حفار و غیره)، عوامل مدیریتی، تعمیر و نگهداری و تجربه و مهارت پرسنل می‌تواند خلاصه کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود عوامل زیادی در ضریب بهره‌وری دخیل هستند. بنابراین مدلی که بتوان همه عوامل را در آن دخیل کرد کار مشکلی است به همین علت است که تحقیقات محدودی در این زمینه انجام شده است. این تحقیق جزو آن چند تحقیق محدودی است که در این زمینه انجام شده بنابراین همان‌طور که روابط اولیه‌ای که در زمینه تخمین نرخ نفوذ وجود داشت با یک عامل نرخ نفوذ را تخمین می‌زد و طی چند دهه تکمیل شد. ساپینی و همکارانش در سال ۲۰۰۲ در یک مطالعه صرفاً آماری، ضمن بررسی رابطه بین طبقه‌بندی توده سنگ آر ام آر (RMR) و عملکرد تی بی ام، معنا داری رابطه بین آر ام آر و عملکرد تی بی ام را بررسی و در نهایت اینگونه استنباط شد که اگر چه رابطه بین آر ام آر و نرخ نفوذ معنادار است، ولی برای تخمین ضریب بهره‌وری ماشین نمی‌توان به آن استناد کرد، زیرا پراکندگی بین نتایج بسیار زیاد است [۱۴]. در این بررسی برای تخمین ضریب بهره‌وری فقط مقدار آر ام آر لحاظ شده است. همچنین در پژوهش دیگری که توسط احمدی و همکاران در سال ۱۳۸۹ انجام شده برای تخمین ضریب بهره‌وری از نیروی پیشران، طبقه‌بندی RMR و Q استفاده کرده‌اند [۱۵].

۲- تونل انتقال آب زاگرس ۱

تونل انتقال آب نوسود بخشی از طرح انتقال آب به دشت-

های گرمسیری غرب کشور است که آب منحرف شده از رودخانه سیروان را به پایین دست منتقل کرده و هدف از احداث این تونل، کنترل و تنظیم آب‌های سطحی منطقه وسیعی از غرب کشور و انتقال آن به دشت‌های زراعی منطقه است.

تونل نوسود قطعه یک (تونل زاگرس ۱) از حوالی روستای هیروی تا ازگله ادامه دارد. قطعه اول این تونل (حد فاصل مره خیل تا هیروی) با طولی حدود ۱۴ کیلومتر تحت عنوان قطعه یک- الف اجرا خواهد شد. مقطع تونل به صورت دایره‌ای و با قطر تمام شده ۴/۵ متر و شیب ۰/۰۰۱۰۸۳ برای انتقال آب به صورت ثقلی طراحی شده است. اجرای تونل (حفاری و سگمنت گذاری) به صورت مکانیزه و با استفاده از دستگاه تی بی ام انجام می‌شود. همچنین شروع حفاری تونل به صورت شیب مثبت و از طرف دهانه مره خیل است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به تونل زاگرس ۱ نشان داده شده است.

۳- زمین‌شناسی مسیر حفاری شده

طبق تقسیم‌بندی‌های زمین‌شناسی، گستره مورد مطالعه در دو پهنه (زون) ساختاری از کوهزاد زاگرس قرار گرفته است که عبارتند از پهنه زاگرس شمالی و کمر بند چین‌خورده -رانده زاگرس. بیشتر مسیر تونل از کمر بند چین‌خورده رانده زاگرس عبور می‌کند. در این قسمت از مسیر، پهنه‌های گسله بزرگی بر سر راه تونل قرار گرفته‌اند. بخش ناچیزی از مسیر تونل نیز در پهنه زاگرس شمالی واقع است. بلوک هیروی بر روی لایه‌های گسل خورده از جنس نهشته‌های سیلیسی پهنه زاگرس شمالی واقع شده است. به‌طور کلی واحدهای سنگی کمر بند چین- خورده رانده زاگرس در منطقه مورد مطالعه شامل تناوبی از واحدهای آهکی، شیلی و آهک رسی است. که در یک بازه زمانی بزرگ نهشته شده‌اند. براساس مطالعات صورت گرفته، چند واحد لیتولوژی در این پهنه زمین‌شناسی از گستره مورد مطالعه تفکیک شده است گسل‌های عمده مشاهده شده در مسیر تونل عبارتند از گسل‌های مره‌خیل، مره‌مران، هیرتا-باینگان، بله بزبان و سیروان. در شکل ۲ نمایی از واحدهای مختلف زمین‌شناسی و گسل‌های موجود در مسیر تونل زاگرس ۱ نشان داده شده است.

۴- مشخصات دستگاه حفاری مکانیزه بکار رفته در

پروژه تونل انتقال آب زاگرس ۱

ماشین مورد استفاده در پروژه نوسود قطعه یک - الف از

به آن‌ها جمع‌آوری شد. در این مرحله از تحقیق، داده‌های زمین‌شناسی و اطلاعات عملکرد واقعی دستگاه بر اساس گزارش‌های ثبت شده و مستند در پروژه، شامل بازدید سینه‌کار تونل، انجام آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی مختلف، گزارش‌های روزانه و داده‌های ثبت‌شده توسط پی ال سی^{۱۱} دستگاه، بررسی نقشه‌های اجرا، بررسی گزارش‌های مطالعات مراحل قبل و حین اجرای تونل، جمع‌آوری، دسته‌بندی و ثبت شد. بعد از دسترسی به اطلاعات مورد نیاز، گام بعدی مرتب کردن داده‌ها در بانک اطلاعاتی مناسب است. این بانک اطلاعاتی باید به‌گونه‌ای مرتب شود که داده‌ها هنگام انجام تحلیل‌ها، به‌راحتی قابل استفاده باشند. در این تحقیق بعد از جمع‌آوری اطلاعات مختلف از پروژه مورد بررسی، زمینه لازم برای تجزیه و تحلیل داده‌ها فراهم شد.

در این تحقیق اطلاعات مربوط به حدود دوازده کیلومتر از طول تونل انتقال زاگرس ۱ که در ۱۱۰ مقطع از تونل اندازه‌گیری، جمع‌آوری شده و در انجام تحلیل‌ها از آن‌ها استفاده شده است. داده‌های جمع‌آوری شده به‌صورت یک بانک اطلاعاتی شامل همه داده‌های موجود و در دسترس، در نرم‌افزار اکسل^{۱۲} ذخیره شد تا در هنگام انجام تحلیل‌ها به نرم‌افزار SPSS انتقال داده شوند. اطلاعات پایه مربوط به جزئیات داده‌های مذکور شامل خصوصیات و پارامترهای سنگ‌های در برگیرنده تونل و همچنین خصوصیات و پارامترهای مربوط به ماشین حفاری تی بی ام استفاده شده در تونل زاگرس ۱ که تمام تحلیل‌های آنالیز رگرسیون بر روی آن‌ها صورت گرفته و در نهایت منجر به ایجاد روابطی برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری دستگاه شده است، در جداول ۲ و ۳ اطلاعات مربوط به ۷ مقطع ارائه شده است. مقاومت تراکم تک‌محوری و مقاومت کششی سنگ به کمک انجام آزمایش بار نقطه‌ای روی سنگ‌های حاصل از حفاری تخمین زده شده است. در ضمن مقادیر متوسط نرخ نفوذ، سرعت پیشروی، ضریب بهره‌وری، سرعت چرخش صفحه حفار، ضریب بهره‌وری، گشتاور و نیروی پشت صفحه حفار به‌صورت روزانه ثبت و تحلیل شده است.

نوع دبل شیلد سنگ سخت^۶ بوده و به‌صورت دست دوم از پروژه کاستل پیک^۸ در هنگ‌کنگ وارد ایران شده است. این دستگاه با توجه به طراحی اولیه تونل، قطر حفاری کوچک‌تری دارد و قطر اسمی آن ۵۲۷۵ میلی‌متر است ماشین تی بی ام مورد استفاده در کاستل پیک توسط شرکت هرکنشت آلمان طراحی و ساخته شده است. و به‌عنوان یک ماشین نو در سال ۲۰۰۷ برای استفاده در گرانیف کاستل پیک هنگ‌کنگ، با مقاومت فشاری در حدود ۲۵۰ مگاپاسکال برای طول تونلی برابر ۴۵۰۰ متر با سرباره ۴۰۰ متر ساخته شده است. صفحه حفار از نوع سر تخت سنگ سخت به همراه ۳۷ عدد دیسک صفحه حفار ۱۷ اینچی از نوع عقب تعویض شونده^۹ است. مسیر تونل نوسود قطعه یک - الف (زاگرس ۱) که در شکل ۳ نشان داده شده است، به طول تقریبی ۱۴ کیلومتر و دارای سه قوس به شعاع-های ۲۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۵۰۰۰ متر است [۱۶].

۵- ارائه روابطی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری

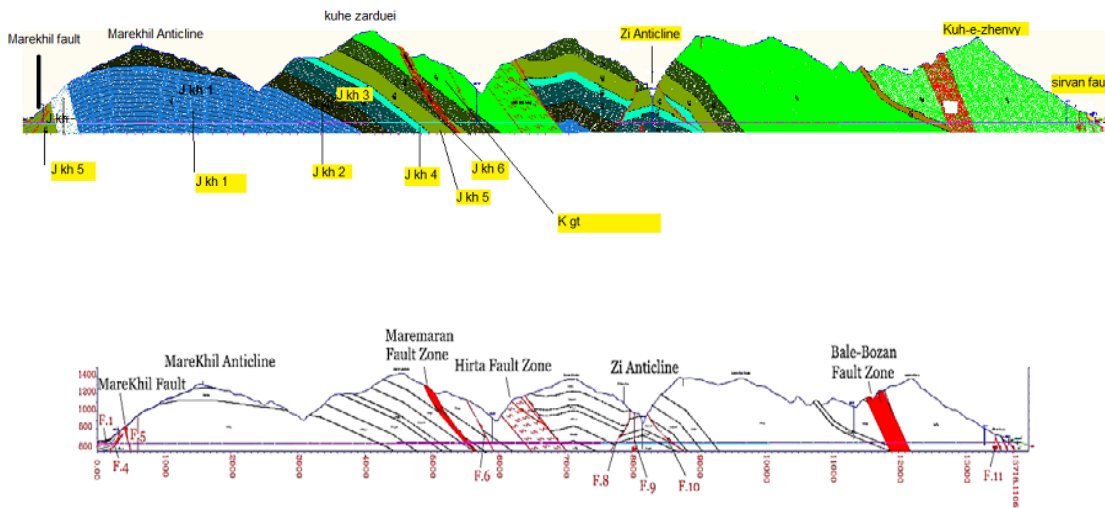
یکی از گسترده‌ترین نیازهایی که در علوم مختلف به وفور دیده می‌شود، مبحث اطلاعات آماری مربوط به هر علم است. در حال حاضر بررسی آماری علوم مختلف با نرم‌افزارهای مختلفی انجام می‌شود که یکی از پرکاربردترین این نرم‌افزارها که در بین متخصصین امر رایج است، نرم‌افزار SPSS^{۱۳} است. از جمله نرم‌افزارهایی است که برای تحلیل آماری در علوم اجتماعی به‌طور وسیع استفاده می‌شود. علاوه بر این، از این نرم‌افزار بوسیله پژوهشگرانی که در علوم مختلف نیاز به بررسی جنبه‌های آماری اطلاعات در آن‌ها دیده می‌شود، استفاده می‌شود. علاوه بر تحلیل‌های آماری از ویژگی‌های دیگر نرم‌افزار می‌توان به توانایی در مدیریت داده‌ها و همچنین مستندسازی داده‌ها، اشاره کرد [۱۷]

۵-۱- جمع‌آوری داده‌ها و ایجاد یک بانک اطلاعاتی مناسب در مسیر تونل

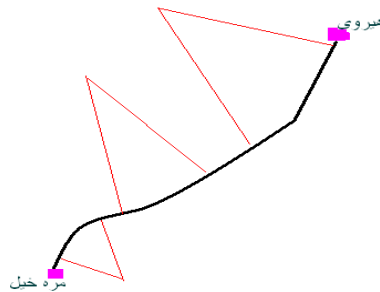
از میان اطلاعات مربوط به پارامترهای مختلف سنگ و دستگاه حفاری که می‌توانستند برای آنالیز و تحلیل در این مطالعه استفاده شوند، در نهایت با توجه به کارهای محققین گذشته هشت مورد از این پارامترها که در دسترس قرار داشته و توسط عملیات میدانی در تونل زاگرس ۱ به‌دست آمده بود برای انجام فرآیند آنالیز، انتخاب و اطلاعات و داده‌های مربوط



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و راههای دسترسی تونل زاگرس [۱۶]



شکل ۲: واحدهای زمین‌شناسی و گسل‌های موجود در مسیر تونل [۱۶]



شکل ۳: پلان مسیر تونل نوسود قطعه یک- الف (تونل زاگرس ۱) با سه قوس (در شکل مرکز، شعاع و محدوده قوس‌ها مشخص شده

است) [۱۶]

و خروجی‌های حاصل از آنالیز رگرسیون چند متغیره برای ضریب بهره‌وری در مدل ۹ ارائه شده است.

به این ترتیب، با استفاده از ضرایب جداولی مانند ۴ نه رابطه برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری ایجاد خواهد شد که در جدول ۵ روابط مربوط به هر مدل به همراه ضریب همبستگی آن‌ها مشاهده می‌شود. در نهایت با بررسی روابط تعریف شده برای مدل‌های مختلف، رابطه ای را که بالاترین ضریب همبستگی را داشته باشد به‌عنوان رابطه برگزیده پیش‌بینی ضریب بهره‌وری تی بی ام انتخاب می‌شود. خلاصه روابط و اطلاعات مربوط به آنالیز رگرسیون چند متغیره در جدول ۵ نشان داده شده است.

با بررسی مدل‌های مختلف و روابط حاصل شده از آن‌ها در جدول ۵ مشاهده می‌شود که رابطه مربوط به مدل، ضریب همبستگی بالاتر و خطای کمتری (مقدار sig پایین‌تری) نسبت به سایر روابط و مدل‌ها دارد. نکته دیگر این‌که مدل ۸، هرچند بالاترین ضریب همبستگی را دارد، اما با توجه به جداول خروجی حاصل از تحلیل‌های رگرسیون انجام گرفته در نرم‌افزار SPSS خطای بالایی برای دو متغیر مستقل گشتاور و زاویه امتداد ناپیوستگی‌ها دارد، بنابراین این رابطه نمی‌تواند رابطه دقیق و بدون خطایی باشد. همبستگی‌های حاصله بین متغیرها در حقیقت به‌صورت توابع خطی هستند. به عبارت دیگر، این برنامه بهترین رگرسیون را بین پارامترها در یک ترکیب خطی با یک سطح اطمینان ۹۵ درصد، ارائه می‌دهد. بنابراین مدل ۹ به‌عنوان مدل پیشنهادی تجربی برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری انتخاب می‌شود، معادله ایجاد شده بین پارامترهای مستقل و نرخ نفوذ با رابطه ۳ نشان داده شده است.

$$UF = -0.001thrust + 1.89RPM + 7.34DPW - 0.26UCS + 68 \quad (3)$$

UF: ضریب بهره‌وری (%)، RPM: سرعت چرخش صفحه حفار (دور بر دقیقه)، DPW: میانگین فاصله بین ناپیوستگیها (متر)، UCS: مقاومت فشاری تک محوری سنگ (MPa)، thrust: نیروی پیشران صفحه حفار (KN).

۵-۲- آنالیز رگرسیون چند متغیره برای ایجاد رابطه

پیش‌بینی ضریب بهره‌وری تی بی ام

نتایج بررسی همبستگی بین متغیرهای مستقل نشان می‌دهد که بین پارامترها به‌صورت دو به دو روابطی مشاهده می‌شود که در اکثر موارد ضریب همبستگی کمتر از ۰/۱۹ است که در این حالت رابطه خیلی اندک و قابل چشم‌پوشی است اما قوی‌ترین رابطه بین دو پارامتر گشتاور و توان و همچنین نیروی پیشران صفحه حفار و توان مشاهده می‌شود، که بیشترین همبستگی را متغیر توان دستگاه با دو متغیر گشتاور و نیروی پیش‌ران دستگاه دارد. بنابراین در مرحله بعدی تحلیل رگرسیون خطی می‌توان توان دستگاه حفاری را در نظر نگرفته و آن را حذف کرد. برای انجام آنالیز رگرسیون خطی چندمتغیره برای تعیین درصد تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل در افزایش یا کاهش ضریب بهره‌وری و برقراری رابطه‌ای معنی‌دار بین آن‌ها، متغیرهای مستقل که در اینجا پارامترهای مربوط به ماشین و خصوصیات سنگ‌های در برگیرنده تونل می‌باشند، به‌ترتیب و به‌صورت گام به گام به نرم‌افزار وارد شده و هر کدام از متغیرها برای ایجاد یک مدل جدید به‌ترتیب به محیط آنالیز رگرسیون اضافه می‌شوند. در این مرحله ضریب بهره‌وری را که به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد، به جایگاه مربوط به خود، یعنی پنجره وابسته انتقال داده و سایر پارامترها که متغیرهای مستقل هستند باید به پنجره مستقل‌ها انتقال داده شوند، که متغیرهای مستقل را به‌صورت مرحله به مرحله به این پنجره وارد نموده، به گونه‌ای که در هر مرحله یک متغیر اضافه و بررسی می‌شود و خروجی آن به‌عنوان یک مدل که در آن ضرایب مربوط به میزان تأثیر هر پارامتر در تغییرات ضریب بهره‌وری و همچنین میزان ضریب همبستگی و سایر پارامترهای خروجی تعیین شده است، در نظر گرفته می‌شود. به همین ترتیب سایر پارامترها نیز هر کدام در هر مرحله جدید اضافه شده و یک مدل جدید ایجاد می‌شود. در نهایت نه مدل آنالیز رگرسیون خطی ایجاد خواهد شد. با استفاده از ضرایبی که برای هر یک از پارامترها در خروجی فرآیند آنالیز رگرسیون خطی تعیین شده است، می‌توان یک رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و ضریب بهره‌وری در هر مرحله و برای هر مدل تولید شده، تعریف کرد. در جدول ۴ به‌عنوان نمونه ضرایب

جدول ۲: اطلاعات و داده های مربوط به خصوصیات سنگ، ضریب بهره‌وری و نرخ نفوذ در تونل زاگرس ۱ [۱۶]

ایستگاه تونل	تونل (درجه)	زاویه امتداد نایبوستگی‌ها با محور	فاصله بین نایبوستگی‌ها (متر)	پیشروی (سانتیمتر بر ساعت)	بهره‌وری (درصد)	ضریب	نرخ نفوذ (متر بر ساعت)	مقاومت کششی سنگ بکر (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری تگ محوری سنگ بکر (مگاپاسکال)
۱	۲۵	۰/۸	۱۵/۶	۱۰/۴	۱/۵۰	۹/۳	۱۹۹/۷		
۲	۲۱	۱/۶	۱۵/۴	۱۱/۸	۱/۳۰	۹/۳	۱۹۹/۳		
۳	۲۰	۰/۴	۸/۷	۲/۹	۳	۹/۱	۱۹۹		
۴	۴۵	۰/۸	۱۳/۱	۷/۳	۱/۸	۱۰/۳	۱۷۶		
۵	۴۲	۰/۲	۶۶/۷	۲۰/۸	۳/۲۰	۹	۱۸۹/۷		
۶	۴۰	۰/۲	۶۴/۸	۱۹/۸	۳/۲۷	۹	۱۸۹		
۷	۴۱	۰/۴	۶۹/۹	۲۹/۵	۲/۳۶	۹/۸	۱۶۸/۳		

جدول ۳: اطلاعات و داده های مربوط به ماشین حفاری در تونل زاگرس ۱ [۱۶]

ایستگاه تونل	متر از مجموعی	متر از روزانه	توان (کیلووات)	نیروی پشت حفر (کیلو نیوتن) صفحه	گشتاور (متر کیلونیوتن)	سرعت چرخش صفحه حفر (دور بر دقیقه)
۱	۲۶/۵	۳/۵	۴۷۲/۵	۴۵۰۰	۴۰۰	۴
۲	۱۲۸/۵۳	۲/۹۴	۴۸۰	۵۲۲۰	۹۱۲/۵	۶/۲۵
۳	۲۲۶/۰۴	۱/۵۹	۱۱۳۷/۵	۷۰۰۰	۹۰۰	۷
۴	۷۴۸/۴۴	۳/۱۵	۵۳۲	۵۳۰۱	۴۰۰	۷/۱۵
۵	۸۴۲/۹۵	۱۲	۴۷۶	۴۸۹۸	۴۳۰	۷/۴
۶	۹۴۸/۰۹	۱۲	۳۳۶	۴۱۶۶	۴۰۰	۵/۰۵
۷	۱۰۴۵/۶۷	۱۵	۳۹۲	۴۸۷۳	۵۰۰	۵/۱۵

جدول ۴: ضرایب و خروجیهای حاصل از آنالیز رگرسیون چند متغیره برای ضریب بهره‌وری در مدل ۹

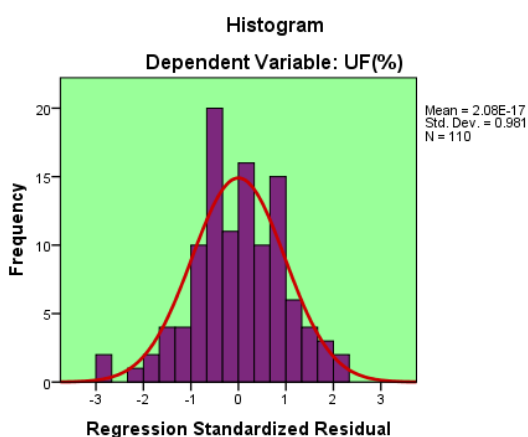
Coefficients^a

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1 (Constant)	68.267	13.244		5.155	.000		
UCS (Mpa)	-.282	.064	-.384	-4.440	.000	.944	1.060
DPW (m)	7.343	2.480	.261	2.961	.004	.912	1.097
rpm	1.896	1.056	.165	1.796	.075	.842	1.188
thrust(KN)	-.001	.001	-.078	-.840	.203	.811	1.234

a. Dependent Variable: UF (%)

جدول ۵: خلاصه روابط بین متغیرهای مستقل و ضریب بهره‌وری در آنالیز رگرسیون چند متغیره

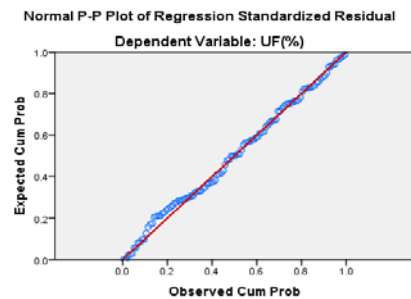
مدل	متغیرها	رابطه با UF	همبستگی
۱	UCS	$UF = -0.37 UCS + 92.8$	۰/۵۰۷
۲	UCS, BTS	$UF = 4.315BTS - 0.4 UCS + 56.9$	۰/۵۳۹
۳	UCS, BTS, DPW	$UF = 6.356DPW + 3.356BTS - 0.37UCS + 56.11$	۰/۵۸۳
۴	UCS, BTS, DPW, Alpha	$UF = -0.03\alpha + 6.4DPW + 3.4BTS - 0.37UCS + 56.2$	۰/۵۸۴
۵	UCS, BTS, DPW, Alpha, RPM	$UF = 1.6RPM - 0.02\alpha + 5.75DPW + 3.22BTS - 0.38UCS + 50/2$	۰/۶
۶	UCS, BTS, DPW, Alpha, RPM, torque	$UF = 0.002torque + 1.6RPM - 0.023\alpha + 5.5DPW + 3.3BTS - 0.37UCS + 46.5$	۰/۶۰۲
۷	UCS, BTS, DPW, Alpha, RPM, torque, thrust	$UF = -0.001thrust + 0.003torque + 2RPM - 0.013\alpha + 5.94DPW + 3.05BTS - 0.378UCS + 53.2$	۰/۶۰۶
۸	UCS, BTS, DPW, Alpha, RPM, torque, thrust, power	$UF = 0.014Power - 0.002thrust + 1.8RPM - 0.013\alpha + 5.9DPW + 3.27BTS - 0.372UCS + 48$	۰/۶۱۵
۹	UCS, DPW, RPM, thrust	$UF = -0.001thrust + 1.89RPM + 7.34DPW - 0.26UCS + 68$	۰/۶۰۸



شکل ۴: هیستوگرام مربوط به مدل ۹

در شکل ۴ نمودار مربوط به هیستوگرام مدل ۹ که بر اساس آن رابطه‌ی ۳ برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری تی بی ام حاصل شده، و در شکل ۵ نمودار مربوط به هیستوگرام نرمال شده آن نشان داده شده است. در شکل ۴ محور افقی هیستوگرام (رگرسیون باقیمانده استاندارد شده (Regression standardized residual)) نشان‌دهنده اختلاف مقدار ضریب بهره‌وری واقعی و پیش‌بینی شده است که هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد رابطه پیشنهادی با خطای کمتری ضریب بهره‌وری را تخمین می‌زند در این هیستوگرام همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار میانگین به صفر نزدیک است و اکثر داده‌ها در حد فاصل میانگین به علاوه انحراف معیار و میانگین منهای انحراف معیار قرار می‌گیرد و داده‌های خارج این حد فاصل کم است در نتیجه مدل پیشنهادی با دقت خوبی می‌تواند ضریب بهره‌وری را تخمین بزند.

و آنچه که در واقعیت رخ داده، انجام می‌شود. جدول ۶ داده-های مربوط به ۱۰ واحد زمین‌شناسی از مسیر تونل انتقال آب قمرود را نشان می‌دهد. با استفاده از این داده‌ها، ضریب بهره‌وری محاسبه شد. در جدول ۷ نتایج رابطه جدید، ارائه شده و با نتایج محاسبه آن‌ها با استفاده از دو روش NTH و CSM مقایسه شده است.



شکل ۵: نمودار نرمال شده رگرسیون ضریب بهره‌وری در مدل ۹

۶- مقایسه نتایج حاصل از معادله ارائه شده و سایر مدل‌ها در تونل انتقال آب قمرود

برای بررسی بیشتر اعتبار رابطه ایجاد شده برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری و چگونگی ارزیابی عملکرد ماشین حفاری تی بی ام توسط آن‌ها، این رابطه را در پروژه تونل انتقال آب قمرود که در آن‌ها نیز از تی بی ام سپر تلسکوپی برای حفاری استفاده شده است، مورد آزمایش قرار داده و با استفاده از رابطه به دست آمده ۳، ضریب بهره‌وری در این پروژه‌ها محاسبه می‌شود. سپس مقایسه نتایج این رابطه و سایر مدل‌ها و روابط ارائه شده

جدول ۶: اطلاعات مربوط به تونل قمرود [۱۸]

UCS (MPa)	BTS (MPa)	DPW (m)	α (درجه)	Rpm	Thrust (KN)	Power (Kw)	مترای	واحد زمین‌شناسی تونل
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۴۶	۶-۵	۵۵۰۰	۵۵۰-۵۰۰	۰-۳۵۰	An
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۴۶	۶-۵	۵۱۰۰	۵۰۰-۴۰۰	۳۵۰-۸۰۰	GSch1
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۵۵	۶/۵-۵/۵	۶۰۰۰	۶۰۰-۵۰۰	۸۰۰-۹۱۹	GSch2
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۴۹	۶/۵-۵/۵	۷۰۰۰	۹۰۰-۷۰۰	۹۱۹-۱۹۰۰	All
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۴۱	۵	۴۹۰۰	۹۰۰	۱۹۰۰-۲۳۰۰	GSch3
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۶۱	۴/۵	۵۱۰۰	-۹۰۰	۲۳۰۰-۳۱۰۰	All
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۳۷	۷	۶۳۰۰	۸۰۰-۶۵۰	۳۱۰۰-۳۲۵۰	GSch4
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۱۸	۶/۵	۶۷۵۰	۸۰۰-۶۵۰	۳۲۵۰-۳۵۰۰	GSch5
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۶۴	۶/۵-۶/۵	۷۲۵۰	۹۵۰-۶۵۰	۳۵۰۰-۳۶۵۰	GSch4
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۴۷	۷/۵-۶/۵	۷۰۵۰	-۹۰۰	۳۶۵۰-۴۶۵۰	MQ

جدول ۷: متوسط ضریب بهره‌وری واقعی و پیش‌بینی شده با روشهای مختلف در مسیر تونل قمرود

روابط ارائه	CSM		NTH		داده های واقعی		متراز	واحدزمین شناسی تونل
	ضریب بهره‌وری (%)	نرخ نفوذ (m/hr)	ضریب بهره‌وری (%)	نرخ نفوذ (m/hr)	ضریب بهره‌وری (%)	نرخ نفوذ (m/hr)		
۲۴	۳۲	۱/۹	۴۰	۲/۴۲	۱۶	۲/۶۳	۰-۳۵۰	An
۲۷	۲۴	۱/۶۱	۳۸	۲/۶۲	۱۹	۲/۲۴	۳۵۰-۸۰۰	GSch1
۲۱	۱۹	۱/۳۴	۳۷	۲/۷	۱۷	۲/۹۱	۸۰۰-۹۱۹	GSch2
۲۲	۱۷	۰/۸۵	۱۷	۰/۸۵	۱۸	۲/۱۰	۹۱۹-۱۹۰۰	All
۲۵/۵	۲۹	۲/۰۳	۳۷	۲/۶۴	۲۲	۲/۹۷	۱۹۰۰-۲۳۰۰	GSch3
۲۷	۱۹	۰/۹۵	۱۹	۱	۱۹	۲/۱۰	۲۳۰۰-۳۱۰۰	All
۳۵	۲۸	۱/۹۴	۳۷	۲/۶۲	۲۰	۲/۹۴	۳۱۰۰-۳۲۵۰	GSch4
۲۹	۲۸	۱/۹۶	۳۷	۲/۶۴	۲۱	۲/۹۷	۳۲۵۰-۳۵۰۰	GSch5
۲۰	۲۸	۱/۹۴	۳۷	۲/۶۲	۲۲	۲/۹۴	۳۵۰۰-۳۶۵۰	GSch4
۳۰	۲۹	۱/۸۴	۳۸	۲/۴۸	۲۴	۲/۷	۳۶۵۰-۴۶۵۰	MQ

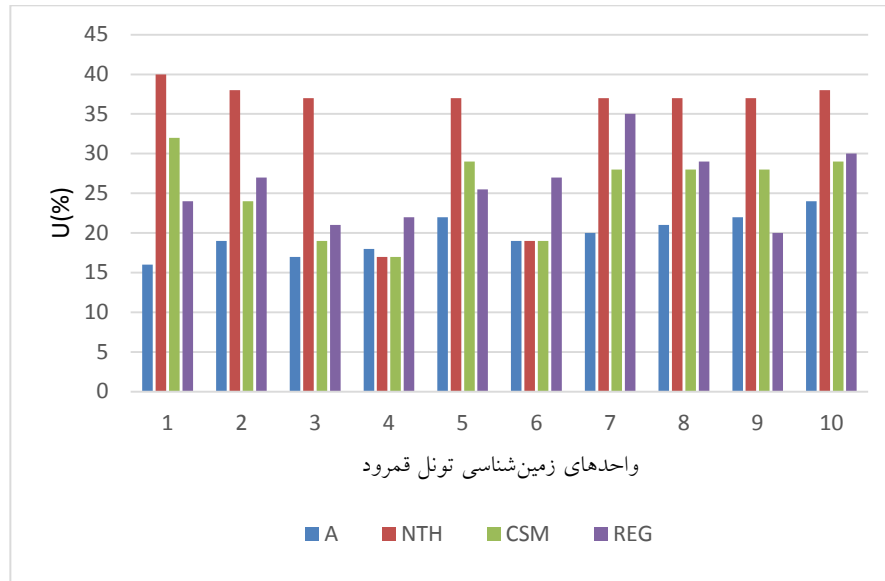
در ادامه، برای مقایسه بهتر نتایج روش‌های مختلف پیش‌بینی ضریب بهره‌وری با مقادیر واقعی حاصل شده در تونل انتقال آب قمرود، خطای نتایج روش رگرسیون با خطای نتایج دو روش NTH و CSM محاسبه شده است (جدول ۸ و شکل ۷).

با توجه به جدول ۸ و شکل ۷ می‌توان گفت، خطای نتایج روش رگرسیون نسبت به مقدار واقعی، کمتر از خطای نتایج حاصل شده نسبت به روش NTH و روش CSM و در برخی موارد بیشتر از روش NTH و کمتر از روش CSM است و در واقع روش رگرسیون بین این دو روش قرار می‌گیرد. علت آنکه نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی (روش رگرسیون) حد واسط نتایج دو مدل CSM و NTH قرار می‌گیرد این است که در مدل CSM فقط پارامترهای ماشین و در مدل NTH پارامترهای توده‌سنگ در نظر گرفته شده است و در رابطه پیشنهادی هر دو پارامترهای ماشین و توده‌سنگ در نظر گرفته شده بنابراین نتایج حاصله حد واسط نتایج دو مدل است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که معادله پیشنهادی در این پروژه با تقریب خوبی نسبت به واقعیت، ضریب بهره‌وری را پیش‌بینی می‌کند.

در مورد علت مقایسه دو پروژه می‌توان چنین بیان کرد که در هر دو پروژه تونل انتقال آب قمرود و نوسود از تی بی ام سپر تلسکوپی استفاده شده است. پارامترهای ماشین حفاری شبیه به هم هستند.

در ضمن هر دو این پروژه‌ها توسط شرکت‌های زیرمجموعه قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا اجرا شده است. در نتیجه پارامترهای مدیریت و مهارت پیمانکار هم مشابه هستند. شرایط زمین‌شناسی دو پروژه کاملاً مشابه نیست هر چند در بعضی موارد مانند تونل‌سازی در زمین‌های مجاله شونده تشابهاتی وجود دارد. قطر دو تونل نیز نزدیک به هم است قطر نهایی تونل قمرود ۳/۸ متر و تونل نوسود ۴/۵ متر است.

شکل ۶ مقایسه نتایج حاصل از محاسبه ضریب بهره‌وری با روش‌های NTH و CSM و رابطه جدید (به‌دست آمده از رگرسیون) با مقادیر واقعی آن‌ها در تونل قمرود را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارها مشخص است مقداری که روش رگرسیون برای محاسبه این دو پارامتر به دست می‌دهد، در برخی موارد بیشتر از میزان واقعی و در برخی از مقاطع کمتر از میزان اندازه‌گیری شده میدانی است، و گاهی نیز مشاهده می‌شود که نتایج روابط ارائه شده ما بین دو روش NTH و CSM است.



شکل ۶: مقایسه نتایج محاسبه ضریب بهره‌وری با روشهای مختلف و میزان واقعی اندازه‌گیری شده در تونل قمرود

جدول ۸: خطای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری توسط روش‌های مختلف با مقدار واقعی ضریب بهره‌وری در تونل قمرود

واحد زمین‌شناسی تونل	مترای	خطای REG (درصد)	خطای NTH (درصد)	خطای CSM (درصد)
An	۰-۳۵۰	۵۰	۱۵۰	۱۰۰
GSch1	۳۵۰-۸۰۰	۴۲/۱	۱۰۰	۲۶/۳۱
GSch2	۸۰۰-۹۱۹	۲۳/۵۲	۱۱۷/۶۴	۱۱/۷۶
All	۹۱۹-۱۹۰۰	۲۲/۲۲	۵/۵۵	۵/۵۵
GSch3	۱۹۰۰-۲۳۰۰	۱۵/۹	۶۸/۱۸	۳۱/۸۱
All	۲۳۰۰-۳۱۰۰	۴۲/۱	۰	۰
GSch4	۳۱۰۰-۳۲۵۰	۷۵	۸۵	۴۰
GSch5	۳۲۵۰-۳۵۰۰	۳۸	۷۶/۱۹	۳۳/۳۳
GSch4	۳۵۰۰-۳۶۵۰	۹	۶۸/۱۸	۲۷/۲۷
MQ	۳۶۵۰-۴۶۵۰	۲۵	۵۸/۳۳	۲۰/۸۳

پی‌نوشت

- ¹ open TBM
- ² single TBM
- ³ Double shielded TBM
- ⁴ Advance rate average
- ⁵ Field penetration index
- ⁶ Basic rock mass rating
- ⁷ Double shield hard rock
- ⁸ Castle Peak
- ⁹ Back-loading
- ¹⁰ Statistical Package For Social Science
- ¹¹ Programmable logic controller
- ¹² Excel

rate in selected Rock types, In Proceedings", Ninth Canadian Rock Mechanic.

[4] Farmer I. W., Glossop N. H., (1980) "Mechanics of disc cutter penetration", Tunnels and Tunneling, Vol. 12, pp 22-25.

[5] Cassinelli F., Cina S., Innaurato N., Mancini R., Smapaolo A., (1982) "Power consumption and metal wear in tunnel boring machines, analysis of tunnel operation in hard rock, Proceedings", Tunneling, Vol. 82, pp 73-81.

[6] Lislerud A., (1988) "Hard rock tunnel boring: Prognosis and costs", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 3, pp 1 9-17.

[7] Bamford, W.E., (1984) "Rock test indices are being successfully correlated with tunnel boring machine performance", Proceedings, Fifth Australian Tunneling conference, Sydney, PP. 218-221.

[8] Innaurato N., Mancini R., Rondena E., Zaninetti A., (1991) "Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy", Seventh International Congress ISRM, Aachen, pp 1009-1014.

[9] Barton N., (1999) "TBM Performance Estimation in Rock Using Q_{TBM} ", Tunnels and Tunneling int., Vol. 31.

[10] Ribacchi R., Lembo-Fazio A., (2005) "Influence of rock mass parameters on the performance of a TBM in a gneissic formation (Varzo Tunnel)", Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 38, pp 105-127.

[11] Bieniawski Z. T., Celada B., Galera J. M., (2007) "Predicting TBM excavability-part I", Tunnels Tunneling Int., pp 32-35.

[12] Hassanpour J., Rostami J., Khamchian M., Bruland A., Tavakoli H.R., (2010) "TBM performance analysis in pyroclastic rocks: a case history of Karaj water conveyance tunnel", Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 26, pp 427-445.

[13] Khademi Hamidi J., Shahriar K., Rezai B., Rostami J., (2010) "Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system", Tunneling and Underground Space Technology", Vol. 25.

[14] Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillo, A., Cardon, G., (2002), "TBM performance estimation using rock mass classification", International journal of rock mechanics and mining sciences, Vol. 39, pp 771-788.

[۱۵] احمدی، م، نجاتی، ح. (۱۳۸۹) "تخمین ضریب بهره‌وری TBM براساس شاخصهای مهندسی توده‌سنگ و نیروی نفوذ ماشین"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۵، شماره ۱۰.

[۱۶] موسسه مهندسی مشاور ساحل، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء(ص)، (۱۳۹۰) "گزارش کارگاهی حفاری و خدمات مهندسی پروژه انتقال آب نوسود قطعه یک الف-تونل زاگرس ۱".

[۱۷] کرلینجر پدهازر، (۱۳۸۸) "رگرسیون چند متغیری در پژوهش رفتاری" (جلد دوم)، ترجمه دکتر حسن پاشا شریفی، انتشارات آوای نور.

[۱۸] شریعت علوی ح. و کاکایی ر.، (۱۳۸۹) "محاسبه ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی دستگاه حفاری تمام مقطع TBM در سنگهای سخت. مطالعه موردی: قطعه اتونل انتقال آب قمرود" نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۵، شماره ۹.